

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Návrh technologického postupu
povrchové úpravy omíláním na
kovových prototypch po 3D tisku**

Proposal of the technological process of
surface treatment by blasting on metal
prototypes after 3D printing

Student:

Bc. Adam Jašek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Jašek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh technologického postupu povrchové úpravy omíláním na kovových prototypch po 3D tisku**
Proposal of the Technological Process of Surface Treatment by Blasting on Metal Prototypes after 3D Printing
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor problematiky.
3. Návrh technologického postupu povrchové úpravy.
4. Technologické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

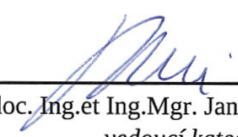
KOZIOR T.; KUNDER C. *Evaluation of the Influence of Parameters of FDM Technology on the Selected Mechanical Properties of Models*, In Procedia Engineering, Volume 192, 2017, Pages 463-468.
GIBSON, Ian a David W. ROSEN. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, c2010, 459 p. ISBN 978-1-4419-1119-3.
Kozlov, Nikita. *Technologie 3D tisku v procesní technice*. Bakalářská práce. Praha 2017. ČVUT. Vedoucí bakalářské práce: Jiří Moravec.
Internetové zdroje www.3d-tisk.cz, www.3dhubs.com, www.thingiverse.com, www.sculpteo.com aj.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: 20.5.2019


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 20.5.2019



Bc. Adam Jašek

Bc. Adam Jašek

Na Lani 226, Nový Jičín – Loučka, 741 03

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JASEK, A. *Návrh technologického postupu povrchové úpravy omíláním na kovových prototypech po 3D tisku*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 49 s., Vedoucí práce Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá problematikou povrchové úpravy omíláním na kovových 3D součástech vyrobených metodou selektivního laserového tavení. Úvod teoretické části diplomové práce přináší stručný výčet metod a materiálů užívaných v aditivní výrobě. Následující kapitoly se skládají z detailního shrnutí problematiky 3D tisku kovů rozebíranými metodami selektivního laserového tavení (dále jen SLM) a selektivního laserového sintrování (dále jen SLS) spolu s vysvětlením výhod jednotlivých technologií a rozdílů mezi nimi. Součástí diplomové práce je experimentální část, která uvádí průběh a hodnocení pěti pokusů s povrchovou úpravou omíláním při použití různých parametrů aplikovaných na prototypch z jednoho druhu materiálu. Závěr práce obsahuje vyhodnocení experimentu s následným výběrem nejvhodnějších parametrů pro povrchovou úpravu omíláním.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

JASEK, A. *Proposal of the technological process of surface treatment by blasting on metal prototypes after 3D printing*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 49 p. Thesis head: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

The master thesis deals with the issue of surface treatment by blasting on metal prototypes produced by Selective Laser Melting technology. Introduction of theoretical part of the thesis contains a brief list of methods and materials used in additive manufacturing. Following chapters consists of detailed summary of 3D metal printing by following methods of selective laser melting (hereafter referred to as SLM) and selective laser sintering (hereafter referred to as SLS) together with the advantages and differences between those technologies. The thesis includes experimental part, in which five experiments with surface treatment by blasting using are conducted with different parameters. The conclusion of the thesis contains the evaluation of the experiment followed by the selection of the most suitable parameters for the surface treatment by blasting.

Obsah

Obsah.....	6
Seznam použitých značek a symbolů.....	8
Úvod.....	9
Cíle diplomové práce jsou:.....	9
1. Úvod do problematiky aditivní výroby	10
2. Aditivní výroba	11
2.1 Obecné rozdělení	11
2.1.1 Vat polymerization	11
2.1.2 Powder bed fusion	12
2.1.3 Material Extrusion	13
2.1.4 Material jetting	13
2.1.5 Binder jetting	14
2.1.6 Sheet lamination	14
2.1.7 Direct energy deposition (DED).....	14
2.2 Základní rozdělení tiskových materiálů.....	15
2.3 Metoda Selective Laser Melting – SLM.....	19
2.3.1 Historie	19
2.3.2 Technologie	20
2.3.3 Materiály a aplikace	22
2.3.4 Výhody metody SLM	25
2.3.5 Nevýhody metody SLM	25
2.4 Využití v průmyslu	26
3. Povrchové úpravy v aditivní výrobě	27
3.1 Rozdělení povrchových úprav	27
3.1.1 Technologie leštění.....	28
3.1.2 Technologie honování	28
3.1.3 Technologie omílání.....	29

4. Experimentální část.....	30
4.1 Příprava součásti po tisku	30
4.2 Omílání	31
4.3 Měření vybraných parametrů drsnosti povrchu	33
4.4 Naměřená data	35
4.5 Statistické zpracování dat	39
4.5.1 Výběrový průměr.....	39
4.5.2 Výběrová směrodatná odchylka	40
4.5.3 Směrodatná odchylka dílčích aritmetických průměrů	42
4.5.4 Kombinovaná standardní nejistota	42
4.5.5 Naměřené hodnoty.....	43
Závěr.....	45
Poděkování.....	46
Seznam obrázků	47
Seznam použité literatury.....	49

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
3D	Trojrozměrný prostor	[-]
ABS	Akrylonitributadienstyren	[-]
CAD	Typ výstupních dat z počítače	[-]
CLI	Zkratka digitálního formátu	[-]
CO ₂	Oxid uhličitý	[-]
DMLS	Direct metal laser sintering	[-]
EBM	Electron beam melting	[-]
FDM	Fused Deposition Modeling	[-]
PLA	Kyselina polymléčná	[-]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
Rz	Výška nerovnosti profilu	[μm]
SLA	Stereolitografie	[-]
SLI	Zkratka digitálního formátu	[-]
SLM	Selektivní laserové tání	[-]
SLS	Selektivní laserové sintrování	[-]
STL	Zkratka digitálního formátu	[-]
UV	Ultrafialové záření	[-]

Úvod

Moderní trendy v oblasti prototypové výroby a mnoha dalších odvětví se čím dál častěji obracejí na 3D tisk a metody s tímto typem výroby spojené. Tisknout lze z mnoha materiálů, různými metodami, avšak každá metoda je vhodná pouze pro výrobky v určité oblasti průmyslu. V oblasti aditivní výroby je také stále mnoho úskalí a neprobádaných míst. Jednu z těchto neznámých představuje i povrchová úprava členitých kovových výrobků. Na součásti vyrobené metodou SLM lze aplikovat konvenční metody obrábění, jako jsou soustružení, frézování, broušení a další. Tyto metody jsou bohužel příliš nákladné a v případě drobných členitých součástí také nepoužitelné. Cílem této diplomové práce je zaměřit se na dokončovací metodu úpravy povrchu malých součástí, a to pomocí technologie omílání za použití tělísek z různých materiálů.¹⁰

Cíle diplomové práce jsou:

V teoretické části:

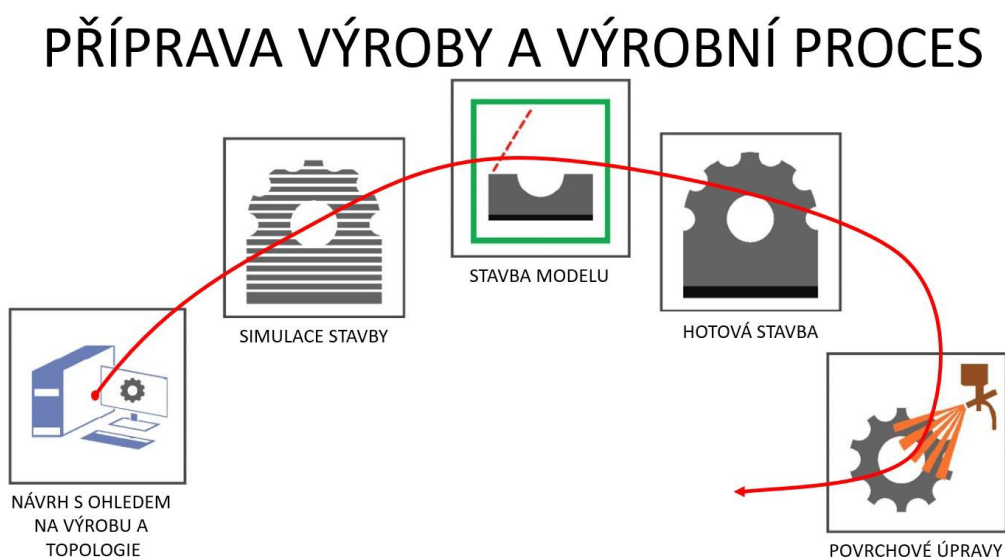
- Přehled aktuálních metod 3D tisku
- Přehled tiskových materiálů
- Rozbor metody tisku kovů SLS
- Seznámení s technologií omílání

V praktické části:

- Detailní popisy experimentů
- Technické podmínky jednotlivých experimentů
- Vyhodnocení experimentů

1. Úvod do problematiky aditivní výroby

Aditivní výrobou jsou nazývány výrobní procesy trojrozměrných součástí pomocí 3D tiskárny. U technologie aditivních procesů je materiál přidáván ve vrstvách ze zásobníku na rozdíl od strojů obráběcích, kde se z jednotného bloku materiál odebírá, dokud nezůstane pouze požadovaný tvar. Před samotným tiskem požadované součásti je nutné vytvořit virtuální návrh objektu v 3D programu pro modelování. Existuje také další možnost a tou je naskenovat existující objekt pomocí skeneru. 3D skener vytvoří pomocí mračna bodů 3D digitální kopii objektu, jejíž jednotlivé plochy je poté nutno upravit specializovaným programem. Výsledná součást následně vzniká postupným nanášením vhodného materiálu po velmi tenkých vrstvách, které se vzájemně spojují např. tavením nebo lepením. Pomocí 3D tisku je možné vytvářet komplikované tvary a konstrukce, jež by nebylo možné vytvořit žádnou metodou obrábění materiálů.¹⁰



Obrázek 1 - Schéma procesu aditivní výroby

Zdroj: <https://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/13-additive-manufacturing-vyrobní-proces-3d-tisk-kovu/>

2. Aditivní výroba

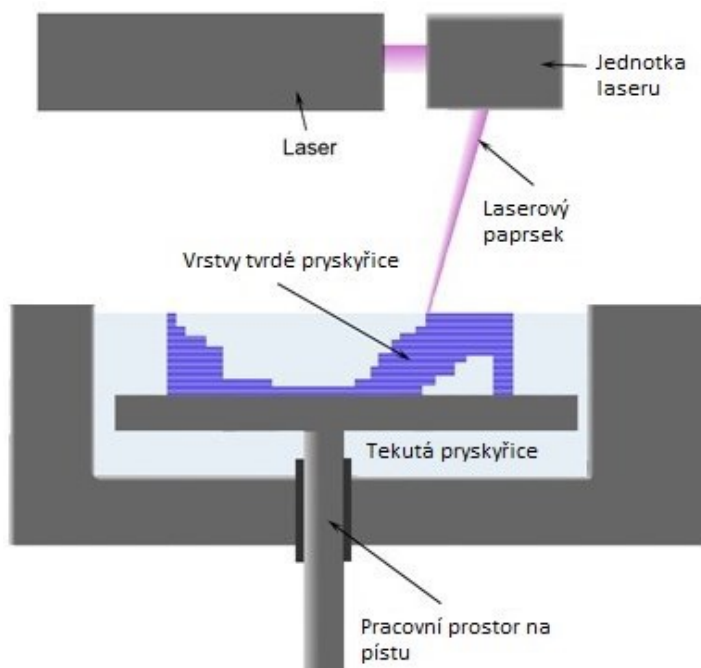
2.1 Obecné rozdělení

Rozdělení metod aditivní výroby se řídí dle normy ISO/ASTM 52900. Tato norma zahrnuje 7 metod aditivní výroby (Material Extrusion, Vat Polymerization, Powder Bed Fusion, Material Jetting, Binder Jetting, Direct Energy Deposition, Sheet Lamination). Tato diplomová práce se zaměřila na Powder Bed Fusion → Selective Laser Melting.²

2.1.1 Vat polymerization

SLA (Stereolithography)

Stereolitografie je nejstarší používanou technologií objevenou již roku 1986. Principiálně je velice podobná technologii SLS. Během tisku metodou SLA dochází k vytvrzování tekutého kompozitu pomocí laserového paprsku.⁸



Obrázek 2 - Princip metody SLA

Zdroj: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>

DLP (Digital Light Processing)

Metoda DLP patří mezi nejnovější technologie založené na nasvícení fotopolymery UV projekcí modelového řezu. Výrobky tvořené touto metodou mají prakticky úplně hladký povrch. Mezi nevýhody patří omezená životnost materiálu.⁸

2.1.2 Powder bed fusion

SLS (Selective Laser Sintering)

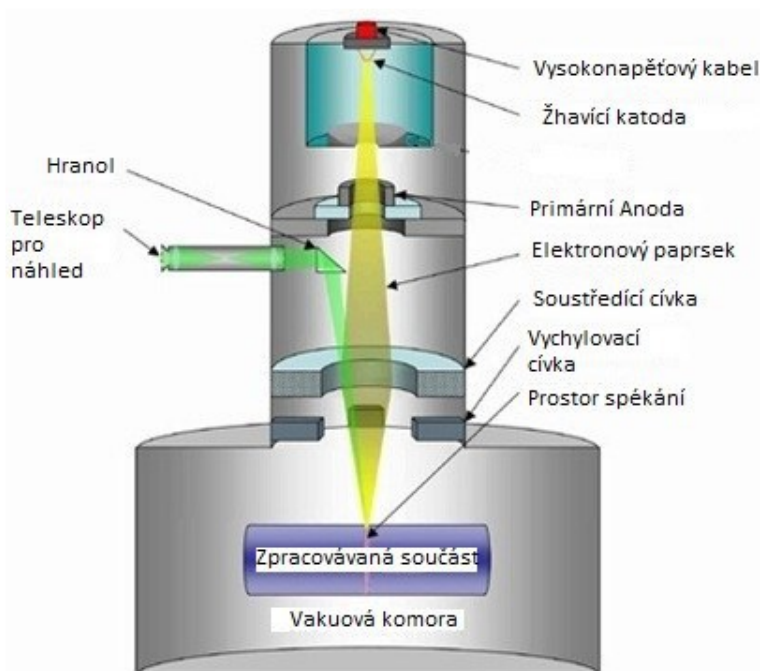
Provádí se spékání práškového materiálu pomocí laserového paprsku. Tloušťky jednotlivých vrstev začínají na přesnosti přibližně 0,1 mm. Metoda SLS používá levný stavební materiál. Na základě použitého druhu modelovacího prášku lze rozlišovat metody: *Laser Sintering – Plastic* (plast), *Laser Sintering – Metal* (kov), *Laser Sintering – Foundry Sand* (písek), *Laser Sintering – Ceramic* (keramika).⁸

SLM (Selective Laser Melting)

Selektivní tavení laserem je technologie aditivní výroby, pomocí které je možné tisknout součásti z kovu. Laser je využíván k roztavení kovového prášku v místech styku po sobě jdoucích vrstev.⁸

EBM (Electronic Beam Melting)

Tato metoda není příliš rozšířená z důvodu technické náročnosti. K vytvoření objektu se užívá usměrněný proud elektronů posílaný do titanového prachu. Výhodou oproti ostatním metodám jsou výjimečná přesnost a skvělé technické vlastnosti vytištěných modelů. Zázemí této technologie je však jedno z nejdražších, neboť tisknout lze pouze bez přítomnosti vzduchu.⁸



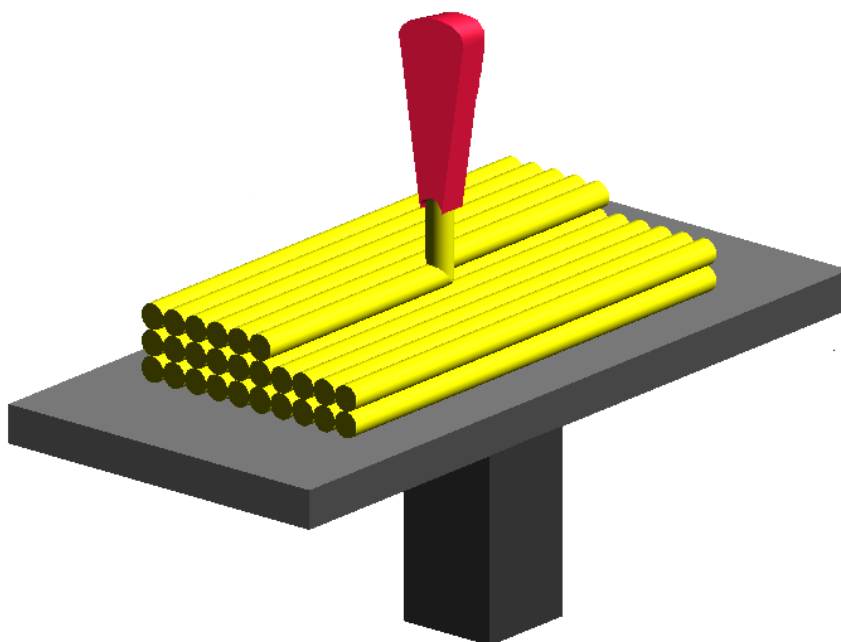
Obrázek 3 - Princip metody EBM

Zdroj: <http://www.popular3dprinters.com/electron-beam-melting-ebm/>

2.1.3 Material Extrusion

FFF/FDM (Fused Filament Fabrication/ Fused Deposition Modeling)

Tyto dvě zkratky v podstatě znamenají totéž, pouze s jedním rozdílem: FDM je registrovaná ochranná značka společnosti Stratasys, a tedy není možné, aby ji používali ostatní výrobci tiskáren. Metoda FDM aplikuje roztavený materiál v tenkých vrstvách. Během stavby modelu jsou využívány dva stavební materiály – modelovací a podpůrný. Tloušťka jedné vrstvy je přibližně 0,25 mm. Během tisku vzniká minimální množství odpadu. Mezi hlavní nevýhody patří velká tloušťka vrstvy a velmi nerovný povrch vodorovné vrstvy.⁸



Obrázek 4 - Princip metody FDM

Zdroj: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>

2.1.4 Material jetting

MJ (Material Jetting)

Metoda využívá tavení vosku na stavební ploše. Materiál je poté ochlazován a tuhne, což umožňuje výstavbu vrstev na sebe. Tato metoda dosahuje velmi dobré přesnosti.⁸

MJP (MultiJet Printing)

Součást je tisknuta pomocí více trysek. Proces probíhá pouze zářením UV žárovky na fotopolymerní materiál. Tištěný díl má hladký povrch a také dobré mechanické vlastnosti.⁸

2.1.5 Binder jetting

BJ (Binder Jetting) = **ZCORP** (Z Corporation – Z Printing)

Pojivo vytlačované z tiskových hlav pojí tenkou vrstvu naneseného prášku. Výsledný povrch není hladký, tisknutá součást je křehká a vyžaduje další povrchovou úpravu. Jde o rychlou a levnou technologii.⁸

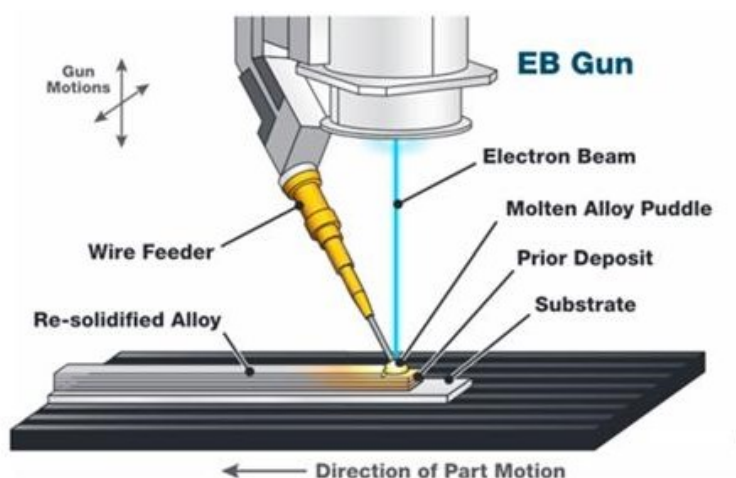
2.1.6 Sheet lamination

LOM (Laminated Object Manufacturing)

Touto metodou je každá vrstva vyříznuta z plastu a plošně přilepena k vrstvě předchozí. Tloušťky jednotlivých vrstev se pohybují v rozměrech přibližně 0,165 mm. Výhodou metody LOM je cenově dostupný stavební materiál. Mezi hlavní nevýhody patří nevyužití velkého množství použitého materiálu (odpad).⁸

2.1.7 Direct energy deposition (DED)

Metoda využívající materiál ve formě drátu nebo prášku. Tavení materiálu lze provést laserem, elektronovým paprskem nebo plazmovým obloukem uvnitř řízené komory za snížené hladiny kyslíku. Samotný tisk probíhá pomocí 4 nebo 5 osých ramen, a proto nedochází ke změně průtoku materiálu. Lze využít možnost tisku s pevnou pozicí tiskové hlavy. Doba ochlazování materiálu je velmi rychlá a to až $5000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlost chlazení má velký vliv na výslednou strukturu zrn. Typická tloušťka vrstvy se pohybuje mezi 0,25mm až 0,5mm.⁶



Obrázek 5 - Princip metody Direct Energy Deposition

Zdroj: <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>

2.2 Základní rozdělení tiskových materiálů

KOV

Výrobu složitých dílů tvářením či sléváním s následným obráběním lze nahradit technologií kovového 3D tisku. Technologie 3D tisku přináší mnoho výhod, mezi hlavní spadá úspora času a financí spolu s možností tisknout konstrukčně složité díly, které by nebylo možné vyrobit obvyklým způsobem. Materiál je nejčastěji dodáván v podobě kovového prášku.⁸



Obrázek 6 - Tiskový materiál – Kov

Zdroj: <https://www.e15.cz/magazin/reportaz-3d-tisk-kovem-aneb-vytiskni-ten-sroubek-1282587>

SKLO

Jako tiskový materiál je používán skleněný prášek získávaný recyklací starého skla. V tryskách je materiál smíchán se speciálním pojídlem, které drží model pohromadě.⁸



Obrázek 7 - Tiskový materiál – Sklo

Zdroj: <https://www.3dees.cz/a-sklari-nebudou-mit-co-zrat-mit-prislo-s-3d-tiskarnou-na-sklo>

ORGANICKÝ MATERIÁL

Je využíván hlavně ve zdravotnictví; nejznámějším případem je vytisknutí čelisti s její následnou implantací. Vědci již byli schopni vytisknout lidské ucho. Použitý materiál obsahoval hydrogel spolu s živými buňkami a alginátem, který zajišťoval dostatečnou pevnost a pružnost. Nynější problematika tisku organického materiálu s následnou implantací spočívá v tisku čistě z buněčného materiálu bez příměsi cizorodých látek.⁸



Obrázek 8 - Tiskový materiál – Organický materiál

Zdroj: <https://www.cad.cz/component/content/article/27-clanky/5226-3d-se-zatim-tiskne-hlavne-z-plastu-v-budoucnu-si-z-kmenovych-bunek-vytisknete-treba-novou-ledvinu.html>

PLAST

Momentálně nejfrekventovanějším materiálem pro 3D tisk je plast. Mezi nejpoužívanější plasty se řadí: ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) a PLA (Polylactid acid – kyselina polymlečná).⁸



Obrázek 9 - Tiskový materiál – Plast

Zdroj: <http://veteraninatruc.cz/cs/nase-sluzby/3d-tisk/>

KERAMIKA

Z keramiky je možné tisknout kuchyňské náčiní i umělecké předměty. Po samotném tisku je nutné aplikovat povrchovou úpravu glazováním a výrobek vypálit v peci jako běžnou keramiku.⁸

ČOKOLÁDA

Jako jeden z mála potravinových materiálů se čokoláda osvědčila pro použití s technologií FDM. Jelikož je možné čokoládu snadno působením tepla přivést do pastovitého stavu, a chová se pak podobně jako plastické hmoty používané při běžném 3D tisku, její použití otevírá nové možnosti. Problematika tisku čokolády spočívá ve správném namíchání hmoty, její chuti a barvy. Poté je hmota nalita do válcového zásobníku, ze kterého je postupně vytlačována na podložku, kde tisková hlava nakreslí požadovaný tvar.⁸



Obrázek 10 - Tiskový materiál – Čokoláda

Zdroj: <https://www.3dees.cz/reklama-z-cokolady-na-3d-tiskarne>

BETON

Používá se pro tisk domů, které mají mít mnohem lepší vlastnosti než domy běžně stavěné nyní. Budou energeticky úsporné, protože betonová směs obsahuje příměsi zlepšující tepelnou izolaci a tvrdost stěn.⁸



Obrázek 11 - Tiskový materiál – Beton

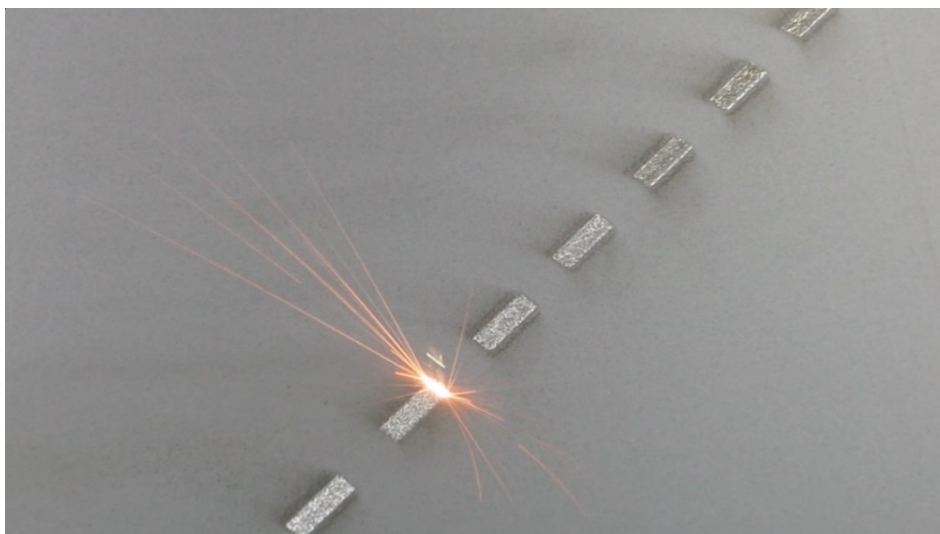
Zdroj: <http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/technologie-3d-tisku-v-architekture-stavebnictvi>

2.3 Metoda Selective Laser Melting – SLM

2.3.1 Historie

Metoda SLM je jednou z několika technologií 3D tisku. Zrod se datuje k roku 1995 v institutu Fraunhofer ILT působícím v německém městě Caching. Výsledkem německého projektu byl takzvaný ILT SLM patent DE 19649865. Během počáteční fáze výzkumníci Dr. Dieter Schwarze a Dr. Matthias Fockele z F&S Stereolithographietechnik GmbH v Paderbornu spolupracovali s ILT výzkumníky Dr. Wilhelmem Mienersem a Dr. Konradem Wissenbachem. Na počátku tisíciletí uzavřela F&S obchodní partnerství s firmou MCP HEK GmbH (později přejmenovanou na MTT Technology GmbH a SLM Solutions GmbH) působící v Lübecku na severu Německa. V dnešní době Dr. Dieter Schwarze zastává pozici ve firmě SLM Solution GmbH a Dr. Matthias Fockele založil společnost Realizer GmbH.⁹

Normativní výbor ASTM International F42 zařadil metodu SLM do kategorie „slinování laserem“, i když toto pojmenování je nesprávné. Při použití SLM výrobní metody se kov kompletně roztaví do tuhé homogenní hmoty, na rozdíl od metody SLS, která je dokonalým příkladem slinovacího procesu. Technologie aditivní výroby SLM se často nazývá Direct Metal Laser Sintering (DMLS), je to pojmenování vytvořené firmou EOS. Bohužel je to velmi zavádějící, neboť v reálném procesu metody SLM se součást taví během výroby, zatímco metoda DMLS nevyužívá slinování. Tento proces je ve všech bodech velmi podobný SLM technologii a často je považován za SLM metodu. Avšak technologie velmi podobná metodě SLM se nazývá Electron Beam Melting (EBM).⁹

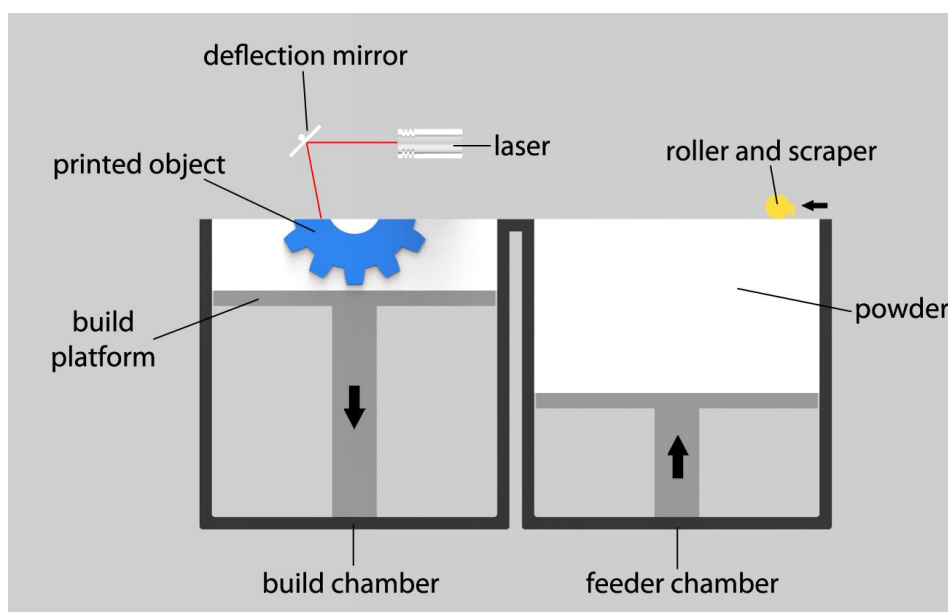


Obrázek 12 - Tisk vrstvy

Zdroj: <https://www.metal-am.com/researchers-identify-optimal-parameters-to-print-3d-high-density-metal-parts/>

2.3.2 Technologie

SLM technologie využívá různé slitiny, což umožňuje prototypům mít tytéž funkční vlastnosti jako konvenčně vyrobené součásti ze stejného materiálu. Vzhledem k tomu, že tisknutý díl je vrstvený po jednotlivých tiskových vrstvách, je možné navrhovat organické geometrie spolu s vnitřními prvky, které by nebylo možné odlít či jinak obrobít. Metodou SLM se vyrábějí silné, odolné kovové součásti, které mají využití jako funkční prototypy, tak i koncové výrobky. Tiskový proces začíná rozdělením 3D dat do jednotlivých vrstev výsledného výrobku. Tloušťka vrstev se obvykle pohybuje od 20 μm do 100 μm . Tyto řezy vytvoří 2D náhled jednotlivých vrstev a uloží jej do průmyslově standardizovaného formátu .stl, který využívá většina technologií 3D tisku používajících vrstvy nebo technologii stereolithografie. Soubor se poté nahraje do softwarového balíčku pro úpravu dat před samotným tiskem. V tomto balíčku je nutné přiřadit parametry pro finální výrobek (zvolený materiál s jeho vlastnostmi) a přidat fyzické podpory v kritických částech součásti. Univerzálnost balíčku umožňuje použít takto připravená data na různých typech strojů aditivní výroby. Většina mechanických součástí daného přístroje se nachází ve stavební komoře. Jde o laser s výkonem 200 W a plošinu pro výdej materiálu se stavěcí základnou. Na této plošině jsou zarovnávací čepele pro nános nového materiálu během tisku. Jednotlivé vrstvy jsou vytvářeny separátně o tloušťkách 20 μm . Pracovní schéma pro metodu SLM je zobrazené na obrázku 13.²

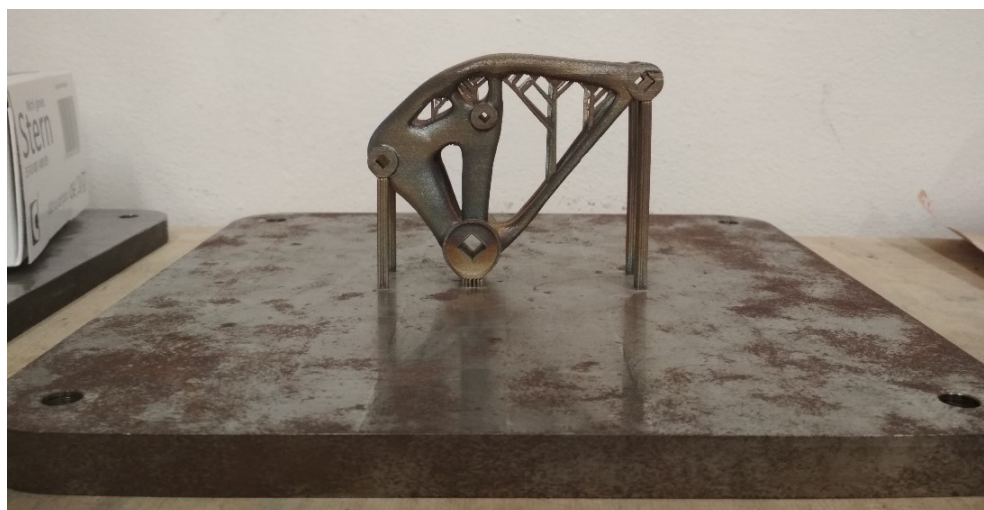


Obrázek 13 - Schéma procesu SLM

Zdroj: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs/>

Při selektivním tavení laserem jsou tenké vrstvy atomizovaného jemného kovového prášku rovnoměrně rozloženy pomocí uhlazovacích lišt na substrátovou desku. Materiál podkladové desky bývá obvykle kov. Deska je připevněna k indexovacímu stolu, který se pohybuje ve svislé ose (Z). Tento proces probíhá v uzavřené komoře s řízenou atmosférou. Plyny používané při tisku metodou SLM musí být inertní, nejčastěji jsou to směsi argonu nebo dusíku. Díky inertní atmosféře je možné pracovat s reaktivními kovovými prášky, jako jsou hliníkové a titanové slitiny.⁹

Jakmile byla 3D data rozdělena na jednotlivé 2D řezy, začne samotný tisk jednotlivých vrstev. Při tisku laser kopíruje 2D řez a v daných místech roztavuje prášek. Během výroby dochází k plnému protavení materiálu, čímž je dosahována jeho až 99.9 % hustota. To je výsledkem využití vysoce výkonného laserového paprsku, obvykle generovaného vláknovým laserem s výkonem stovek wattů. Laserový paprsek je nasměrován ve směru osy X a Y dvěma vysokofrekvenčními skenovacími zrcadly. Energie laseru je dostatečně intenzivní, aby umožnila kompletní roztavení částic za vzniku pevného, homogenního kovu. Tento proces se opakuje po jednotlivých vrstvách až do dokončení dílu. Takto vytisknutou součást s názornou ukázkou podpěr a stavěcí plochy lze vidět na obrázku 13.⁹

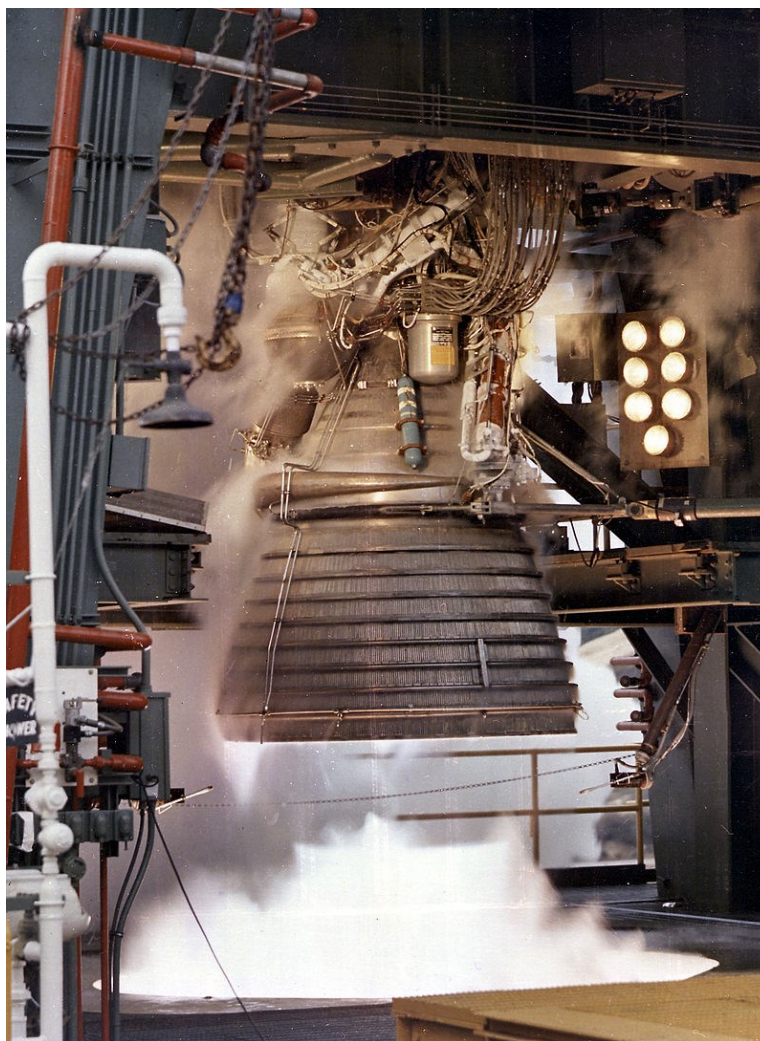


Obrázek 14 - Vytisknutá součást s podpěrami

2.3.3 Materiály a aplikace

Druhy aplikací vhodné pro proces selektivního laserového tavení jsou složité geometrie a struktury s tenkými stěnami, skrytými dutinami či kanály nebo velmi malými rozměry. Výhodou je tvorba hybridních forem, kde mohou být společně vytvořeny pevné, částečné či mřížkové geometrie pro jeden objekt. Příklady hybridních forem jsou využívány především v ortopedii. Mezi takto vyráběné produkty patří kyčelní kloub, kloubní jamka nebo jiné ortopedické implantáty, kde dochází k osseointegraci (přechod mezi živou tkání a umělým tělesem). Velká část výzkumu technologie SLM se zaměřuje na lehké součásti pro letectví a kosmonautiku, kde jsou konvenční metody obrábění nedostačující. Omezení obrábění takovýchto součástí spočívá ve složitosti nástrojů či v nedostatečném přístupu nástroje k povrchu součásti. Aditivní výroba všechny tyto problémy odstraňuje a díky způsobu výroby výsledného produktu je možné uspořit materiál (tríscky v případě konvenčních metod).⁹

Konvenční metody obrábění mají vysoké ekonomické náklady na přípravu před samotným spuštěním obrábění dílu (tvorba forem, nástrojů), zatímco finanční náklady aditivní výroby převážně spočívají v časové náročnosti. Konvenční výroba více součástí rozpustí cenu přípravy výroby do počtu kusů, zatímco aditivní výroba nikoliv, proto je výhodné vyrábět aditivní výrobou pouze malé množství kusů. Do těchto podmínek spadá výroba náhradních dílů pro staré stroje (např. automobiloví veteráni) nebo tvorba výrobků kusového charakteru (implantáty). Středisko letů NASA experimentuje s technologiemi v otázce, jak vyrobit obtížně obrobitelné součásti z niklových slitin pro raketové motory J-2X a RS-25. Raketový motor J-2X je znázorněn na obrázku 15. Na základě testů na těchto součástech vyrobených různými metodami obrábění se ukázalo, že komponenty vyrobené aditivní výrobou jsou poněkud slabší než díly kované a frézované. Ovšem nespornou výhodou aditivní výroby je absence svarových spojů, které jsou nejslabšími místy celého produktu.



Obrázek 15 - Raketový motor J-2X

Zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/Rocketdyne_J-2#/media/File:J-2_test_firing.jpg

Technologie SLM je využívána pro výrobu komponent pro nejrůznější odvětví včetně průmyslu leteckého, zdravotního a další, které ovšem splňují požadavek na malé až středně velké komponenty se složitou geometrií, a nástrojový průmysl (tvorba vložek pro vstřikovací formy). SLM spadá do nákladově i časově velmi efektivních technologií. Většina průmyslových odvětví využívajících technologie SLM používá tuto metodu převážně ke tvorbě prototypů, neboť metoda SLM při výrobě prototypů výrazně snižuje jak celkový čas potřebný k vývoji nového produktu, tak díky zjednodušení montáže i náklady. Možnosti využití složitých geometrií způsobí zmenšení celkového počtu komponentů potřebných pro danou sestavu výrobku, protože díky běžné stavěcí ploše (EOS EOSINT M280) o rozměrech 250x250x325mm a schopnosti „nesting“ je možné nechat růst více součástí najednou.⁹

Dne 5. září 2013 prezentovala společnost SpaceX veřejnosti regeneračně chlazenou komoru raketového motoru SuperDraco (znázorněna na obrázku 16). Skutečnost, že tato komora byla kompletně vyrobena na tiskárně EOS 3D z vysoce legované slitiny kovu Inconel, byla naprostou novinkou v oboru. Společnost SpaceX ovšem na toto prohlášení navázala 4. května oznámením o plně letuschopném motoru kompletně vytištěném metodou SLM. Tímto získala světové prvenství za plně funkční raketový motor splňující všechna nařízení a regulace, který byl kompletně vyrobený pomocí aditivní výroby. Použitím aditivní výroby spolu s materiálem Inconel, což je slitina niklu a železa, je raketový motor schopen pracovat při tlaku 6900 kPa (1000 psi) při velmi vysoké teplotě. Testovací a schvalovací proces byl dokončen v květnu roku 2014, první reálný provoz v kosmu byl ovšem uskutečněn až v dubnu 2018. Technologie 3D tisku umožnila motoru SuperDraco výrazně snížit dodací lhůty ve srovnání s tradičními odlitky a získat lepší pevnost, tažnost a odolnost proti lomu spolu s menší variabilitou vlastností materiálů.⁹



Obrázek 16 - Spalovací komora vyrobená metodou SLM

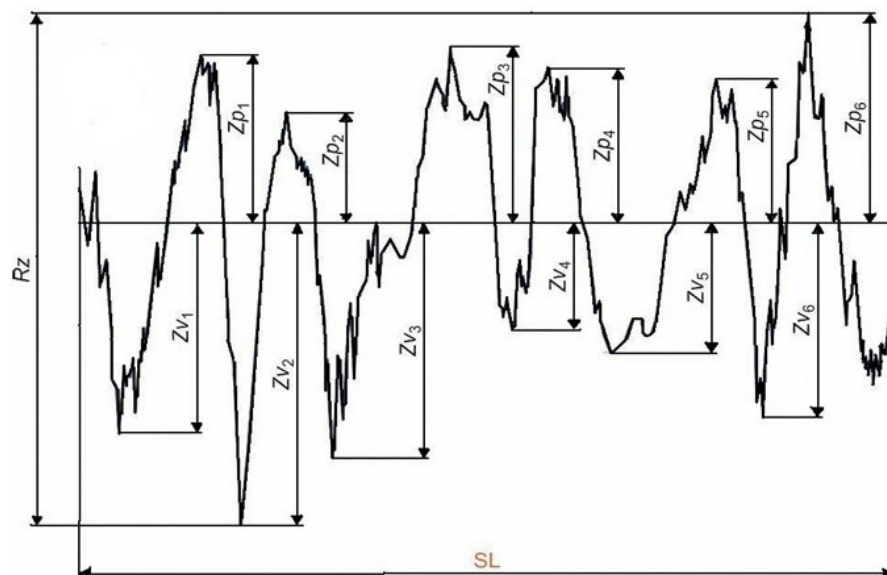
Zdroj: https://www.spaceflightinsider.com/wp-content/uploads/2015/05/3-D_Printed_SuperDraco_Engine.jpg

2.3.4 Výhody metody SLM

Technologie SLM má mnoho výhod oproti konvenčním výrobním technologiím. Schopnost rychle vyrobit jedinečnou součást je bezpochyby nejzřejmější, protože není třeba vyrábět speciální nástroje. Takto vyráběné součásti jsou připraveny během několika hodin. Součásti vyrobené metodou SLM umožňují přísnější testování prototypů. Protože SLM je schopna používat většinu slitin, prototypy nyní mohou být plně funkčním dílem vyrobeným ze stejného materiálu jako zamýšlený výrobek v sériové výrobě. Technologie SLM je také jedna z mála metod aditivní výroby využívaných v kusové výrobě. Vzhledem k tomu, že komponenty jsou tvořeny po jednotlivých vrstvách, je možné navrhovat vnitřní prvky a průchody, které by nebylo možné vyrobit odléváním, či je jinak obrobít. Komplexní geometrie a sestavy s více díly mohou být zjednodušeny na méně dílů, což zefektivní montáž a sníží výslednou cenu za prototyp. Metoda nevyžaduje žádné speciální nástroje, tudíž je vhodná pro malosériovou výrobu.²

2.3.5 Nevýhody metody SLM

Před použitím této technologie by měly být zváženy aspekty velikosti i detailů součásti, následné povrchové úpravy a rovněž tisk přes rozměrovou chybu v ose Z, neboť mohou být rizikovými faktory při metodě SLM. Naproti tomu v ose X a Y se nacházejí jednotlivé 2D řezy namodelovanou součástí, a proto v těchto místech mohou být tolerance součásti velmi dobře řízeny. Nezávisle na použitém materiálu zanechává metoda SLM zrnitý povrch jednak z důvodu velikosti jednotlivých zrn, jednak kvůli sekvencím vytváření jednotlivých vrstev nanášecím a uhlazovacím mechanismem. Proto je třeba povrchy obvykle vyleštit, aby bylo dosaženo zrcadlového lesku nebo extrémně jemného povrchu. Při výrobě nástrojů je třeba prioritně vyřešit hustotu materiálu hotové součásti. Například u vložek pro vstřikovací formy způsobí jakékoliv povrchové nedokonalosti defekty na plastovém dílu. Zároveň musí takto vyrobená vložka mít stejné vlastnosti jako materiál formy (tepelná vodivost, chemická stálost atd.).⁹



Obrázek 17 - Schéma drsnosti

Zdroj: <https://www.mbcaslib.cz/mereni-drsnosti.html>

Odstranění kovové podpůrné struktury a následná aplikace povrchových úprav je časově náročný proces. Během těchto operací je využíváno obráběcích technologií, jako jsou elektrojiskrové obrábění či práce bruskou. Povrchová úprava laserovým leštěním funguje na principu mělkého povrchového natavování vytištěné součásti. Rychle se pohybující paprsek energie natavuje nejvyšší hodnoty drsnosti. Roztavená hmota pomocí gravitace a tlaku laseru poté proudí z povrchových nerovností do jemných trhlin. Díky tomu se účinně sníží drsnost povrchu dané součásti.⁹

Pro využití většiny strojů aditivní výroby je zapotřebí soubor .stl. Soubor generují veškeré hlavní CAD programy (Solid Works, CATIA, AutoCad) a obsahuje pouze surová data v binárním formátu. Pro další práci na 3D tiskárnách je nutno tato data upravit do formátu .cli nebo .sli (formát vyžadovaný pro nestereolitografické zařízení). Z důvodu potřeby speciálního převodního programu je nutno kalkulovat cenu tohoto programu do výsledné ceny výrobku.⁹

2.4 Využití v průmyslu

Letectví

Výroba vzduchotechniky, svítidel, montážních prvků pro specifické letecké součásti technologií laserového slinování (dále jen LS) vyhovuje potřebám komerčního i armádního letectví.⁹

Výroba

Technologie LS nachází uplatnění na trhu s nízkými objemy produkce za konkurenceschopné ceny. LS je nezávislé na množstevních nákladech, což dovoluje nezátěžovat se optimalizací výrobního procesu.⁹

Zdravotnictví

Zdravotnické prostředky jsou vysoce nákladné produkty. Musí přesně splňovat požadavky zákazníka. Tato kritéria nevyplývají pouze z osobních preferencí uživatele, nýbrž je nutno splnit i požadavky určené legislativou a normy, které jsou pro jednotlivé státy velmi rozdílné. To vede k výrobě velkého množství druhů stejného produktu v nízkých objemech.⁹

Prototypy

Technologie slinování laserem umožňuje výrobu designových i funkčních prototypů. Na základě toho je možné začít výsledný produkt testovat dříve, než je uveden do sériové výroby, za mnohem nižší náklady. Tyto prototypy jsou také použité pro schvalovací procesy výrobků zákazníkem.⁹

Nástroje

Konvenčními metodami výroby nástroje jsou obrábění či elektrojiskrové obrábění. Předností aditivní výroby je zkrácení výrobního času (nástrojové vložky jsou vyrobeny přes noc, mnohdy dokonce během několika hodin). Rovněž svoboda návrhu může být použita pro optimalizaci výkonu takto vytvářeného nástroje (například integrace chladicích kanálů do nástroje).⁹

3. Povrchové úpravy v aditivní výrobě

3.1 Rozdělení povrchových úprav

Tak jako u konvenčních metod obrábění je i v případě aditivní výroby mnohdy třeba na výslednou součást aplikovat dokončovací povrchové úpravy z důvodu vyhlazení tiskových vrstev či zlepšení vzhledových vlastností. Mezi metody těchto finálních úprav spadají jak mechanické, tak chemické procesy. K nejčastěji využívaným povrchovým úpravám pro kovové součásti patří leštění (chemické, brusné pasty), honování a omílání.

3.1.1 Technologie leštění

Leštění spadá mezi dokončovací operace obráběním, kterým se zlepšuje vzhled obrobeného povrchu. Takto se odstraňují různé povrchové nečistoty, například oxidy kovů nebo oduhličené vrstvy. Dochází k jemnému úběru materiálu, a tím ke snižování drsnosti povrchu. Nedochází však ke zlepšení rozměrové ani geometrické přesnosti výrobku.¹

Princip metody spočívá v pohybu brusného kotouče po povrchu součásti, současně se kotouč otáčí obvodovou rychlostí 5 m.s^{-1} až 30 m.s^{-1} . V případě vysoké drsnosti se používají brusiva z umělého korundu, v případě jemného leštění je aplikována leštící pasta. Leštěním je možné dosáhnout drsnosti povrchu $Ra=0,1 \text{ } \mu\text{m}$ až $0,4 \text{ } \mu\text{m}$.¹

Leštění se rozděluje do následujících kategorií:

- **Mechanické** – materiál je odebírán mechanickým působením zrn brousících materiálů
- **Chemické** – k úběru materiálu dochází chemickým působením vhodného roztoku na povrch obrobku
- **Elektrochemické** – úběr materiálu se děje elektrochemickým rozpouštěním vrcholků nerovností povrchu

3.1.2 Technologie honování

Honování je vlastně broušení malou řeznou rychlostí. Nejčastěji je používáno pro dokončování vnitřních válcových ploch, jako například válců spalovacích motorů, kompresorů a hydraulických zařízení. Tyto případy jsou nazývány vnitřním honováním. Lze také honovat vnější válcové plochy. Podstatou honování je tedy broušení vnitřních a vnějších válcových ploch honovacími kameny upnutými v honovací hlavě. Kameny jsou přitlačovány k obráběné ploše tlakem $0,35$ až $1,40 \text{ MPa}$. Při honování otvorů vykonává honovací hlava složený pohyb otáčivý a současně přímočarý ve směru své osy.¹

Při hrubovacím honování lze dosáhnout přesnosti IT6 až IT7 a drsnosti povrchu $Ra=0,4 \text{ } \mu\text{m}$ až $0,8 \text{ } \mu\text{m}$ a v případě jemného honování dosahuje přesnost IT5 a drsnost povrchu $Ra=0,1 \text{ } \mu\text{m}$ až $0,2 \text{ } \mu\text{m}$.

3.1.3 Technologie omílání

Je to mechanická úprava povrchu drobných a malých kovových součástí prováděná hromadným způsobem v omílacích zařízeních. Omílání je prováděno pomocí různého typu a tvaru omílacích tělísek. Při používání hrubších typů dochází spíše k brusnému efektu, používání jemnějších typů způsobuje vyleštění. Existují technologie suché a mokré. V případě mokřích technologií jsou využívány suspenze, převážně vodné, často za přítomnosti chemických přísad pro urychlení omílacího procesu a zlepšení jakosti povrchu.⁴

Typy omílání:

- **Rotační omílání** – používá se pro menší díly ve velkých sériích, kdy opracovávané součásti i omílací prvky mají zpravidla tvar válce
- **Vibrační omílání** – součásti jsou omílány pomocí vibračního pohybu, výkon je vyšší než při rotačním omílání
- **Odstředivé omílání** – je to hrubší omílání součástí, které jsou planetově uspořádány

Typy omílacích tělísek:

- **Přírodní** – mají nízkou životnost, patří sem drcená žula, odřezky kůže, dřevěné piliny
- **Umělá** – obsahují další přídavné složky: oxid hlinitý, karbid křemíku, případně kalené ocelové kuličky

Při omílání je nutné aplikovat chemickou látku chlorid sodný nebo nitrid sodný za účelem odmaštění povrchu součástí, zabránění koroze a vyhlazení ostrých hran. U omílání závisí jakost povrchu obrobku na celkovém čase omílání (2-6 hodin). Dále je drsnost povrchu úzce spjata se zvoleným omílacím prostředkem a chemickou emulzí. Parametry dosahované omíláním jsou $Ra=0,1 \mu m$ až $0,4 \mu m$.⁴

4. Experimentální část

Cílem této diplomové práce je vytvoření technologického postupu povrchových úprav na prototypu součásti vytištěné metodou SLM. Experiment byl proveden v laboratořích VŠB Ostrava. Samotný pokus byl rozdělen na 4 fáze: příprava součásti po tisku, omílání, měření vybraných parametrů drsnosti a vyhodnocení experimentu.

4.1 Příprava součásti po tisku

Samotná součást byla po vytažení z 3D tiskárny připevněna podpěrami k základové desce. Jednotlivé díly bylo nutné mechanicky oddělit. Pomocí rozbrušovačky byly podpěry přerušeny a jednotlivé díly uvolněny.



Obrázek 18 - Zkušební vzorek po tisku I.



Obrázek 19 - Zkušební vzorek po tisku II.

Poté bylo zapotřebí zbavit jednotlivé vzorky zbytků podpěr. Stav před počátkem této operace a po dokončení lze vidět na obrázcích 18 až 21. Toho bylo docíleno pomocí kombinovaných kleští, štípacích kleští a ochranných brýlí proti úlomkům a ochranných rukavic. Tato operace zabrala přibližně 1,5 hodiny pro 9 vzorků. Následoval druhý krok omílání součástí v omílacím stroji s jednotlivými typy omílacích tělísek.



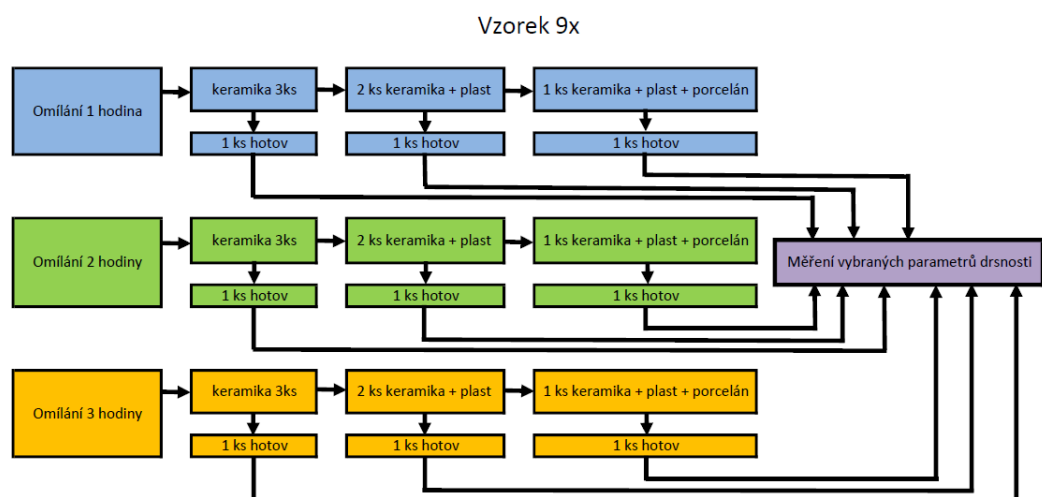
Obrázek 20 - Zkušební vzorek před zahájením zkoušky I.



Obrázek 21 - Zkušební vzorek před zahájením zkoušky II.

4.2 Omílání

Omílání bylo provedeno v kulové omílačce **CF 1x32 Element Wet**¹¹ od firmy OTEC zobrazené na obrázku 24. Před samotným započítáním bylo třeba nastavit stoj a jednotlivé parametry (doba, rychlost rotace bubnu a složení kopaundu). Omílací směs v první fázi pokusu, zobrazená na obrázku 23, se skládala z keramických omílacích tělísek, vody s průtokem 15 l/hod a emulze. Během procesu docházelo k odvodu odpadní vody (směs emulze, vody, drobných částeczek kovu a opotřebovaných tělísek) pomocí hadice zobrazené vpravo na obrázku 24. Tato fáze se opakovala celkem 3x po dobu 60 minut. V celém průběhu omílání byl jediným změněným parametrem materiál tělísek, a to v následujícím pořadí: 180 minut omílání v keramických těliscích, 120 minut omílání v plastových těliscích (viz Obrázek 25) a na závěr 60 minut omílání v porcelánových těliscích (viz Obrázek 26). Každých 60 minut byly odebrány 3 vzorky a zařazeny do příslušných kategorií pro další postup experimentu.



Obrázek 22 - Schéma experimentu



Obrázek 24 - Omlací stroj



Obrázek 23 - Omlací směs



Obrázek 26 - Porcelánová tělíska



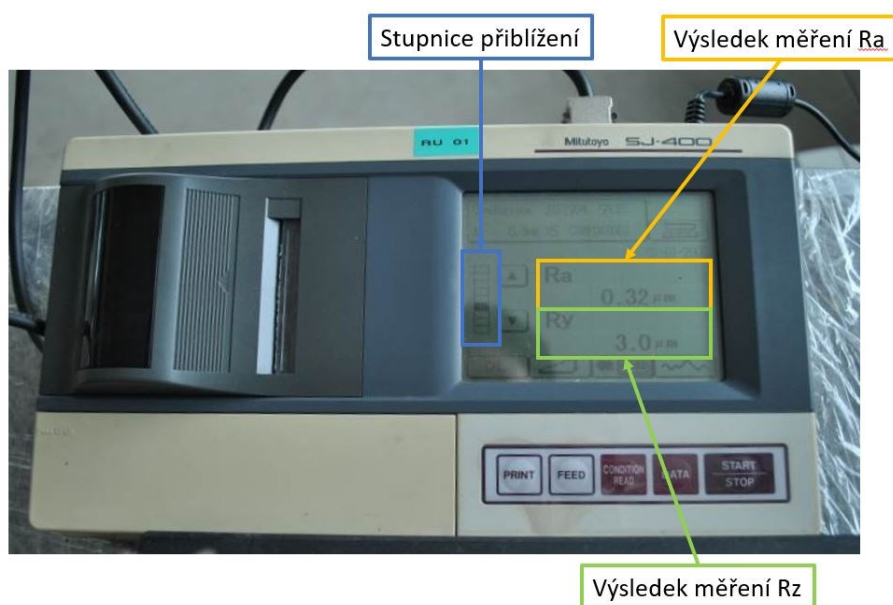
Obrázek 25 - Plastová tělíska

4.3 Měření vybraných parametrů drsnosti povrchu

Třetí krok pokusu – měření vybraných parametrů drsnosti probíhalo na drsnoměru od firmy Mitutoyo Surftest SJ-400. Toto zařízení vyhodnocuje drsnost a vlnitost rovinných ploch pomocí softwaru SJ-Tools. Drsnoměr je zobrazen na obrázku 28. Zařízení obsahuje přehledný displej, stojan, pracovní plochu, čtecí jehlu a aretační šroub pro vertikální posuv. Parametry nastavené pro měření tohoto experimentu byly následující:⁵

- Norma: JIS2001 GAUSS
- $L=0,8\text{mm}$ RANGE(800)

Jelikož součást neobsahovala dostatečně velké rovinné plochy, bylo nutno vymyslet způsob uchycení součásti. K tomu postačil kus modelíny, do které byla součást dostatečně vtisknuta a ustavena na pracovní plochu. Takto ustavená součást je zobrazena na obrázku 29. V této fázi bylo provedeno přiblížení měřicího hrotu pomocí aretačního šroubu. Během přiblížení bylo třeba sledovat stupnici přiblížení na displeji zařízení zachyceném na obrázku 27. Jakmile byl ukazatel přesně ve středu stupnice, bylo zahájeno samotné měření. Během procesu měření konala měřicí jehla přímočarý pohyb po ploše vzorku v délce 0,8 mm a zpět do původní polohy. Následně byl výsledek měření zobrazen na informačním displeji. Po naměření první hodnoty byl aretační šroub povolen, vzorek mírně posunut s následným dotažením aretačního šroubu a spuštěním nového měření. Tento postup se opakoval 10x pro každý vzorek. Výsledky jednotlivých měření jsou zaznamenány v tabulkách 1 – 9 obsažených v následující kapitole.



Obrázek 27 - Informační displej



Obrázek 28 - Drsnoměr Mitutoyo SurfTest SJ-400



Obrázek 29 - Měřicí jehla

4.4 Naměřená data

Tato kapitola obsahuje výsledky hodnot naměřených pro jednotlivé vzorky.

Vzorek – 1 hod/keramika		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	5,18	32,3
2.	5,25	31,9
3.	5,35	33,2
4.	5,43	30,1
5.	5,15	28,8
6.	5,23	30,3
7.	5,15	33,1
8.	5,42	34,1
9.	5,44	34,9
10.	5,27	32,6
Σ	52,87	321,3

Tab. 1 Naměřené hodnoty po 1 hodině v keramických těliscích

Vzorek – 2 hod/keramika		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	2,10	11,1
2.	3,11	26,8
3.	2,54	22,3
4.	1,49	13,5
5.	1,87	10,1
6.	1,89	7,6
7.	1,91	7,3
8.	1,90	7,7
9.	1,90	7,8
10.	1,88	8,4
Σ	20,54	122,6

Tab. 2 Naměřené hodnoty po 2 hodinách v keramických těliscích

Vzorek – 3 hod/keramika		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	2,08	14,2
2.	2,20	14,5
3.	2,30	15,7
4.	2,33	16,1
5.	2,34	16,4
6.	1,39	5,9
7.	1,33	6,1
8.	1,45	6,3
9.	2,18	12,5
10.	2,38	13,1
Σ	19,65	120,8

Tab. 3 Naměřené hodnoty po 3 hodinách v keramických těliscích

Vzorek – 1 hod/keramika + plast		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	5,53	26,0
2.	5,67	27,2
3.	5,78	27,4
4.	5,85	27,6
5.	5,93	27,7
6.	5,98	27,6
7.	6,03	27,9
8.	6,06	28,2
9.	6,10	28,4
10.	6,15	28,3
Σ	59,08	276,3

Tab. 4 Naměřené hodnoty po 1 hodině v keramických a plastových těliscích

Vzorek – 2 hod/keramika + plast		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	2,93	17,3
2.	3,25	16,7
3.	3,38	16,5
4.	3,45	16,2
5.	3,49	16,1
6.	2,50	15,4
7.	2,58	15,9
8.	2,65	15,8
9.	2,60	15,5
10.	2,71	15,9
Σ	29,54	161,3

Tab. 5 Naměřené hodnoty po 2 hodinách v keramických a plastových tělísčích

Vzorek – 3 hod/keramika + plast		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,53	1,8
2.	0,50	1,7
3.	0,53	1,8
4.	0,52	1,9
5.	0,53	1,7
6.	0,53	1,8
7.	0,52	1,7
8.	0,53	1,7
9.	0,53	1,7
10.	0,99	5,2
Σ	5,71	21

Tab. 6 Naměřené hodnoty po 3 hodinách v keramických a plastových tělísčích

Vzorek – 1 hod/keramika + plast + porcelán		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	1,40	14,8
2.	1,27	15,2
3.	1,40	13,4
4.	1,43	12,9
5.	1,44	12,7
6.	2,16	13,9
7.	2,00	14,5
8.	1,90	14,7
9.	1,95	14,4
10.	1,96	14,2
Σ	16,91	140,7

Tab. 7 Naměřené hodnoty po 1 hodině v keramických, plastových a porcelánových těliscích

Vzorek – 2 hod/keramika + plast + porcelán		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,78	10,7
2.	0,74	10,6
3.	0,74	10,5
4.	0,75	10,6
5.	0,76	10,7
6.	0,75	10,6
7.	0,78	10,8
8.	0,77	10,7
9.	0,94	11,5
10.	0,96	11,6
Σ	7,97	108,3

Tab. 8 Naměřené hodnoty po 2 hodinách v keramických, plastových a porcelánových těliscích

Vzorek – 3 hod/keramika + plast + porcelán		
Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]
1.	0,38	4,5
2.	0,39	4,7
3.	0,38	4,4
4.	0,37	4,4
5.	0,38	4,3
6.	0,38	5,0
7.	0,37	4,0
8.	0,37	3,5
9.	0,37	3,9
10.	0,36	3,2
Σ	3,75	38,9

Tab. 9 Naměřené hodnoty po 3 hodinách v keramických, plastových a porcelánových těliscích

4.5 Statistické zpracování dat

Statistické zpracování dat bylo aplikováno na hodnoty naměřené pro vzorky omílané 1 hodinu v keramických těliscích. Postup výpočtu pro naměřené hodnoty zbylých vzorků je totožný, pouze s jinými vstupy.⁷

4.5.1 Výběrový průměr

Parametr drsnosti Ra

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x}_{Ra} = \frac{1}{10} \cdot 52,87 \mu\text{m}$$

$$\bar{x}_{Ra} = 5,287 \mu\text{m}$$

Parametr drsnosti Rz

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x}_{Rz} = \frac{1}{10} \cdot 321,3 \mu\text{m}$$

$$\bar{x}_{Rz} = 32,13 \mu\text{m}$$

4.5.2 Výběrová směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Parametr drsnosti Ra

$$\Delta Ra_1 = (Ra_1 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,18 - 5,287)^2 = 1,144 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_2 = (Ra_2 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,25 - 5,287)^2 = 1,369 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_3 = (Ra_3 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,35 - 5,287)^2 = 3,969 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_4 = (Ra_4 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,43 - 5,287)^2 = 2,044 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_5 = (Ra_5 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,15 - 5,287)^2 = 1,876 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_6 = (Ra_6 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,23 - 5,287)^2 = 3,249 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_7 = (Ra_7 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,15 - 5,287)^2 = 1,876 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_8 = (Ra_8 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,42 - 5,287)^2 = 1,768 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_9 = (Ra_9 - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,44 - 5,287)^2 = 2,341 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Ra_{10} = (Ra_{10} - \bar{x}_{Ra})^2 = (5,27 - 5,287)^2 = 2,89 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^2$$

Parametr drsnosti Rz

$$\Delta Rz_1 = (Rz_1 - \bar{x}_{Rz})^2 = (32,3 - 32,13)^2 = 2,89 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Rz_2 = (Rz_2 - \bar{x}_{Rz})^2 = (31,9 - 32,13)^2 = 5,29 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Rz_3 = (Rz_3 - \bar{x}_{Rz})^2 = (33,2 - 32,13)^2 = 1,144 \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Rz_4 = (Rz_4 - \bar{x}_{Rz})^2 = (30,1 - 32,13)^2 = 4,12 \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Rz_5 = (Rz_5 - \bar{x}_{Rz})^2 = (28,8 - 32,13)^2 = 11,088 \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Rz_6 = (Rz_6 - \bar{x}_{Rz})^2 = (30,3 - 32,13)^2 = 3,348 \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Rz_7 = (Rz_7 - \bar{x}_{Rz})^2 = (33,1 - 32,13)^2 = 9,409 \cdot 10^{-1} \mu\text{m}^2$$

$$\Delta Rz_8 = (Rz_8 - \bar{x}_{Rz})^2 = (34,1 - 32,13)^2 = 3,88 \mu\text{m}^2$$

$$\Delta R_{Z_9} = (R_{Z_9} - \bar{x}_{Rz})^2 = (34,9 - 32,13)^2 = 7,672 \mu\text{m}^2$$

$$\Delta R_{Z_{10}} = (R_{Z_{10}} - \bar{x}_{Rz})^2 = (32,6 - 32,13)^2 = 2,209 \cdot 10^{-1} \mu\text{m}^2$$

Číslo měření	ΔRa [μm]	ΔRz [μm]
1.	$1,144 \cdot 10^{-2}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$
2.	$1,369 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-2}$
3.	$3,969 \cdot 10^{-3}$	1,144
4.	$2,044 \cdot 10^{-2}$	4,12
5.	$1,876 \cdot 10^{-2}$	11,088
6.	$3,249 \cdot 10^{-3}$	3,348
7.	$1,876 \cdot 10^{-2}$	$9,409 \cdot 10^{-1}$
8.	$1,768 \cdot 10^{-2}$	3,88
9.	$2,341 \cdot 10^{-2}$	7,672
10.	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$2,209 \cdot 10^{-1}$
Σ	$1,194 \cdot 10^{-1}$	32,501

Tab. 10 Rozdíl naměřené a průměrné hodnoty

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum \Delta Ra}{n - 1}}$$

Parametr drsnosti Ra

$$s_{Ra} = \sqrt{\frac{1,194 \cdot 10^{-1}}{10 - 1}}$$

$$s_{Ra} = 0,115 \mu\text{m}$$

Parametr drsnosti Rz

$$s_{Rz} = \sqrt{\frac{32,501}{10 - 1}}$$

$$s_{Ra} = 1,9 \mu\text{m}$$

4.5.3 Směrodatná odchylka dílčích aritmetických průměrů

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$$

Parametr drsnosti Ra

$$s_{(\overline{Ra})} = \frac{0,1152}{\sqrt{10}}$$

$$s_{(\overline{Ra})} = 3,642 \cdot 10^{-2}$$

Parametr drsnosti Rz

$$s_{(\overline{Rz})} = \frac{1,9}{\sqrt{10}}$$

$$s_{(\overline{Rz})} = 6,009 \cdot 10^{-1}$$

4.5.4 Kombinovaná standardní nejistota

$$U_c = k \cdot U_A = k \cdot s_{(\bar{R})}$$

k – koeficient pro správnost výsledku s pravděpodobností 95 % a počtem měření n=10 je k=1,812.³

Parametr drsnosti Ra

$$U_{Ra} = k \cdot s_{(\overline{Ra})}$$

$$U_{Ra} = 1,812 \cdot 3,64 \cdot 10^{-2}$$

$$U_{Ra} = 6,6 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$$

Parametr drsnosti Rz

$$U_{Rz} = k \cdot s_{(\overline{Rz})}$$

$$U_{Ra} = 1,812 \cdot 6,009 \cdot 10^{-1}$$

$$U_{Ra} = 1,088 \mu\text{m}$$

4.5.5 Naměřené hodnoty

Parametr drsnosti Ra

$$Ra = (\bar{x}_{Ra} \pm U_{Ra})$$

$$Ra = (5,287 \pm 6,6 \cdot 10^{-2}) \mu\text{m}$$

Parametr drsnosti Rz

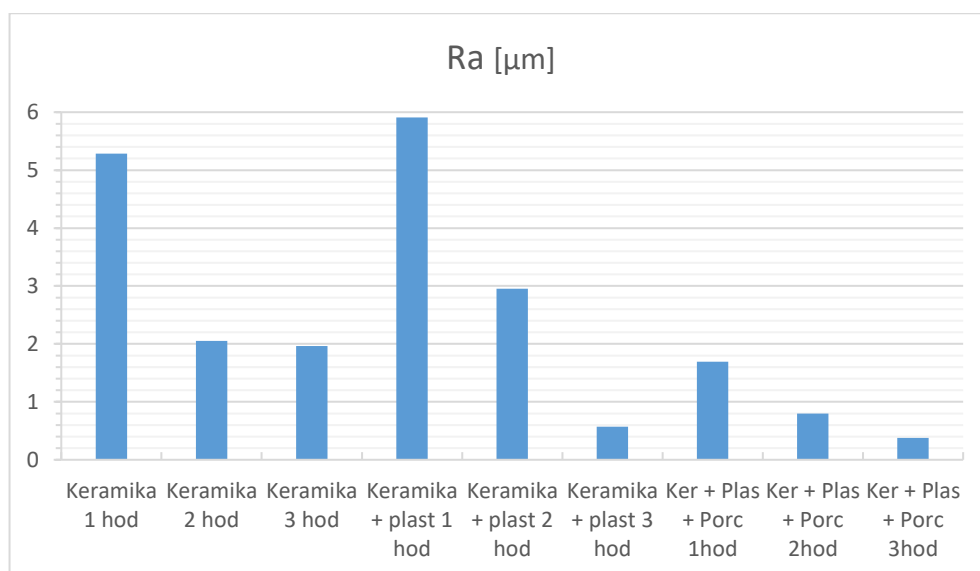
$$Rz = (\bar{x}_{Rz} \pm U_{Rz})$$

$$Rz = (32,13 \pm 1,088) \mu\text{m}$$

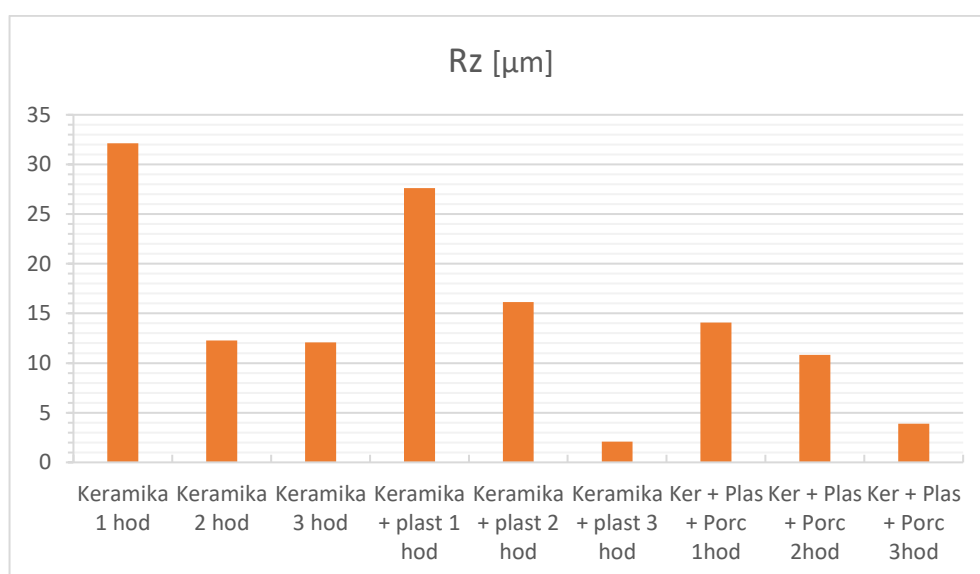
Výsledky statistického zpracování naměřených hodnot parametrů drsnosti včetně nejistoty měření jsou uvedeny v tab.11 spolu s grafy na obr. 29 a 30.⁷

Materiál omílacích tělísek s dobou omílání	Ra [μm]	Rz [μm]
Keramika 1 hodina	$(5,287 \pm 6,6 \cdot 10^{-2})$	$(32,13 \pm 1,088)$
Keramika 2 hodiny	$(2,054 \pm 2,626 \cdot 10^{-1})$	$(12,26 \pm 3,922)$
Keramika 3 hodiny	$(1,965 \pm 2,431 \cdot 10^{-1})$	$(12,08 \pm 2,467)$
Keramika + Plast 1 hodina	$(5,908 \pm 1,143 \cdot 10^{-1})$	$(27,63 \pm 3,979 \cdot 10^{-1})$
Keramika + Plast 2 hodiny	$(2,954 \pm 2,281 \cdot 10^{-1})$	$(16,13 \pm 3,297 \cdot 10^{-1})$
Keramika + Plast 3 hodiny	$(0,571 \pm 8,453 \cdot 10^{-2})$	$(2,1 \pm 6,253 \cdot 10^{-1})$
Keramika + Plast + Porcelán 1 hodina	$(1,691 \pm 1,887 \cdot 10^{-1})$	$(14,07 \pm 4,771 \cdot 10^{-1})$
Keramika + Plast + Porcelán 2 hodiny	$(0,797 \pm 4,702 \cdot 10^{-2})$	$(10,83 \pm 2,228 \cdot 10^{-1})$
Keramika + Plast + Porcelán 3 hodiny	$(0,375 \pm 4,87 \cdot 10^{-3})$	$(3,89 \pm 5,70 \cdot 10^{-1})$

Tab. 11 Výsledky statistického zpracování naměřených hodnot



Obrázek 30 - Výsledky statistického zpracování dat Ra



Obrázek 31 - Výsledky statistického zpracování dat Rz

Z hodnot jednotlivých měření lze jednoznačně vyvodit, že drsnost povrchu závisí na celkové době omílání a druhu použitých tělísek. Jako výsledek lze stanovit účinnost jednotlivých podmínek omílání. Omíláním v těliscích keramických, plastových a porcelánových dosáhneme za 180 minut (3x60minut) přibližně stejného výsledku jako při omílání v keramických těliscích po dobu 120 minut. Stejně tomu je také v případě omílání v keramických a plastových těliscích po dobu 360 minut (2x180 minut). Výsledek je srovnatelný s podmínkami omílání v keramických, plastových a porcelánových těliscích po dobu 540 minut (3x180 minut).

Z hlediska ekonomického hlediska je výhodnější volit časově nenáročné podmínky omílání.

Závěr

Podle výsledků jednotlivých pokusů lze stanovit několik závěrů. Na základě vypracovaného experimentu byly zjištěny následující závislosti:

- Drsnost povrchu závisí na složitosti geometrie součásti a na typu a velikosti omílacích tělísek.
- Špatná kombinace těchto prvků způsobí nedostatečný přístup tělísek k povrchu součásti, a tím nekvalitní povrchovou úpravu.

Kvůli výše zmíněným podmínkám nelze jednoznačně stanovit univerzální technologický postup. Dokončovací povrchové úpravy se musí kus od kusu optimalizovat spolu s geometrií součásti s ohledem na správnou velikost omílacích tělísek a procesních parametrů (složení kopaundu, průtok vody, otáčky).

Nedosažitelnost dokonalého omílání eliminují jiné technologie povrchových úprav, například chemické leštění, které je mnohem méně časově náročné (probíhá v řádech minut). Mezi další technologie patří honování nebo použití brusné pasty. Tyto metody sice odstraňují nedostatky omílání, ale přinášejí zase svou vlastní problematiku (závislost na rozměrech opracovávané součásti či na určitém typu jejích ploch).

Jednoznačně je však podstatné se dokončovacím povrchovým úpravám pro aditivní výrobu věnovat.

Závislost na složitosti geometrie součástí ovšem snahu o stanovení univerzálního technologického postupu pro technologie dokončovacích povrchových značně zkomplikuje. Rozhodnutí o jejich uplatnění v konkrétním případě bude tedy nadále v kompetenci a na zodpovědnosti lidského faktoru.

Poděkování

Diplomová byla vypracována v rámci projektu: „*Moderní a produktivní obrábění a metrologie*“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma procesu aditivní výroby	10
Obrázek 2 - Princip metody SLA	11
Obrázek 3 - Princip metody EBM.....	12
Obrázek 4 - Princip metody FDM.....	13
Obrázek 5 - Princip metody Direct Energy Deposition	14
Obrázek 6 - Tiskový materiál – Kov	15
Obrázek 7 - Tiskový materiál – Sklo	15
Obrázek 8 - Tiskový materiál – Organický materiál.....	16
Obrázek 9 - Tiskový materiál – Plast	16
Obrázek 10 - Tiskový materiál – Čokoláda	17
Obrázek 11 - Tiskový materiál – Beton	18
Obrázek 12 - Tisk vrstvy	19
Obrázek 13 - Schéma procesu SLM.....	20
Obrázek 14 - Vytisknutá součást s podpěrami	21
Obrázek 15 - Raketový motor J-2X	23
Obrázek 16 - Spalovací komora vyrobená metodou SLM.....	24
Obrázek 17 - Schéma drsnosti.....	26
Obrázek 18 - Zkušební vzorek po tisku I.	30
Obrázek 19 - Zkušební vzorek po tisku II.	30
Obrázek 20 - Zkušební vzorek před zahájením zkoušky I.	31
Obrázek 21 - Zkušební vzorek před zahájením zkoušky II.....	31
Obrázek 22 - Schéma experimentu	32

Obrázek 23 - Omílací směs	32
Obrázek 24 - Omílací stroj	32
Obrázek 25 - Plastová tělíska	32
Obrázek 26 - Porcelánová tělíska	32
Obrázek 27 - Informační displej	33
Obrázek 28 - Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-400	34
Obrázek 29 - Měřicí jehla	34
Obrázek 30 - Výsledky statistického zpracování dat Ra	44
Obrázek 31 - Výsledky statistického zpracování dat Rz	44

Seznam použité literatury

- [1] ELUC. *Druhy dokončovacích operací*. [online]. 2015 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1388>
- [2] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer c2010, 459 p. ISBN 1441911200.
- [3] CHAJDIK J., RUBÍKOVÁ E., GUDÁBA M. *Štatistické metódy v praxi*. Bratislava statis 1997, 314 s. ISBN 80-8565-908-5.
- [4] PODJUKLOVÁ, Jitka. *Speciální technologie povrchových úprav I*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita 1994, 76 s. ISBN 80-7078-235-8.
- [5] PRIAM. *Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-400 – PRIAM s.r.o. – Frýdek Místek*. [online]. ©2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.priam.cz/mereni/drsnomer-mitutoyo-surfest-sj-400/>
- [6] SAMES, W. J., F. A. LIST, S. PANNALA, R. R. DEHOFF a S. S. BABU. *The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing*. International Materials Reviews 03.07.2016, 360 s. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
- [7] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [8] Materialpro3d. *Co je 3D tisk*. [online]. 2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
- [9] Wikipedia. *Selective laser melting*. [online]. 28.02.2019 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting
- [10] 3D HUBS. *DMLS/SLM 3D printing*. [online]. 2019 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/3d-printing/processes/dmls-slm/>
- [11] ADVANTAGE – FL s.r.o. *Otec EF 32*. [online]. 2015 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://advantage-fl.cz/reference/reference/step-four-cz>